

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TUBOS DE COMPÓSITO POLIMÉRICO COMPARANDO RESPOSTAS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E DO ENSAIO HIDROSTÁTICO

O. de Carvalho¹, G. Marinucci², J. L. Rossi²

¹ Centro Tecnológico da Marinha - São Paulo/SP – Brasil

carvalhoosni@uol.com.br

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - São Paulo/SP - Brasil

RESUMO

Estruturas tubulares em materiais compósitos são usadas em diversas aplicações devido à sua flexibilidade em atender requisitos superiores de resistência mecânica com baixa massa específica, quando comparadas com materiais de engenharia como aço e alumínio. Devido à anisotropia que o material apresenta, a análise de estruturas de compósitos poliméricos exige ferramentas que considerem esta característica do material, como o método de elementos finitos, por exemplo. Neste estudo, foram obtidas as resistências mecânicas de tubos fabricados pelo processo de enrolamento filamentar (filament winding) por meio de ensaios hidrostáticos, que foram comparadas com valores determinados pelo método numérico. Os tubos foram fabricados com fibra de carbono e matriz de resina epóxi adotando-se configurações de bobinagem simétrica e assimétrica, representadas, respectivamente, por $[90^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}/90^{\circ}]_S$ e $[90^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}/90^{\circ}/+30^{\circ}/-30^{\circ}/90^{\circ}]_T$. Resultados obtidos nos ensaios experimentais revelaram diferenças nos modos de falha e nas resistências mecânicas dos tubos em função das configurações adotadas, que não foram identificadas pelo método de elementos finitos.

Palavras-chave: compósito, *filament winding*, hidrostático, elementos finitos.

INTRODUÇÃO

Os métodos numéricos consistem basicamente na subdivisão da estrutura a ser analisada em elementos convenientemente idealizados. A estrutura é subdividida em pequenos elementos discretos que são conectados uns aos outros formando a estrutura global. É mais fácil se obter a resposta ao carregamento aplicado a um elemento individual do que a análise da estrutura como um todo. A resposta estrutural torna-se então a soma das respostas individuais para carregamentos e deslocamentos externamente aplicados ⁽¹⁾.

Estruturas de compósito polimérico produzidas com filamentos contínuos orientados em camadas são naturalmente anisotrópicas, ou seja, possuem propriedades diferentes em cada eixo de direção como é o caso de tubos produzidos pelo processo de bobinamento filamentar ⁽²⁾. Devido às diferentes propriedades em cada direção, a análise estrutural de componentes exige experiência no uso do método de elementos finitos.

A seqüência de empilhamento das camadas que compõem o laminado é definida na etapa de desenvolvimento do componente e dependendo de como esta seqüência se distribui em relação ao plano médio da espessura do laminado, ocorre o que se pode denominar de laminado simétrico ou assimétrico. O laminado simétrico é aquele no qual a seqüência de camadas depositadas abaixo do plano médio da espessura é uma imagem de espelho da seqüência de camadas depositadas acima deste plano, já no laminado assimétrico a seqüência de empilhamento é arbitrária, não possuindo plano médio de simetria ⁽³⁾.

Quando um laminado é assimétrico, ocorrem tensões residuais que induzem torsões nas camadas. Estas torsões provocam o surgimento de tensões de cisalhamento interlaminares que podem alterar o desempenho da estrutura ^(4,5).

Avaliar a influência da assimetria sobre o desempenho de componentes em compósito torna-se importante, uma vez que no cálculo estrutural pode não ficar evidenciado o efeito da torção que surge da assimetria. Para isto, ensaios hidrostáticos foram realizados em tubos de extremidades abertas comparando-se os resultados com as simulações feitas pelo método de elementos finitos.

O ensaio hidrostático de tubos de extremidades abertas é um ensaio de curta duração que permite avaliar o desempenho da estrutura submetida à pressão interna na sua condição de uso.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os tubos para este estudo foram produzidos pelo processo de bobinamento filamentar, que consiste em um processo automatizado de produção de compósitos de alta qualidade e utiliza uma bobinadeira com controle numérico para a deposição precisa da fibra impregnada sobre um molde. O compósito foi formado utilizando-se a fibra de carbono T300 com 6000 filamentos e matriz composta por uma resina epoxídica DGEBA, um endurecedor metiltetrahidroftálico e um acelerador benzildimetilamina (BDMA).

Para a análise da influência da configuração de bobinagem no comportamento mecânico dos tubos sob o carregamento de pressão interna foram fabricados dois grupos de tubos, cada grupo possuindo sete unidades. As configurações de bobinagem simétrica e assimétrica adotadas foram, respectivamente, $[90^\circ/-30^\circ/+30^\circ/90^\circ_2]_S$ e $[90^\circ/-30^\circ/+30^\circ/90^\circ/+30^\circ/-30^\circ/90^\circ_4]_T$, na qual o ângulo 0° representa o eixo longitudinal do tubo.

Os tubos foram fabricados com 10 camadas, nos quais a espessura nominal de cada camada foi de 0,15 mm. A relação raio-espessura de cada tubo foi de 75, caracterizando-os como tubos de parede fina. As extremidades foram cortadas com disco diamantado para ajuste de um comprimento final adequado ao dispositivo de ensaio hidrostático.

O dispositivo de ensaio hidrostático consiste de um tubo de aço com anéis de vedação nas extremidades que garantem a vedação entre o tubo de compósito montado externamente e o dispositivo. A pressurização é feita por uma entrada de óleo solúvel, localizada em uma das extremidades do dispositivo, que dá acesso à câmara formada entre o tubo de compósito a ser ensaiado e o dispositivo ⁽⁶⁾.

A construção do dispositivo de ensaio hidrostático utilizando tubos de extremidades abertas, permitiu que a pressão interna solicitasse os tubos apenas na direção circunferencial. Os ensaios realizados foram do tipo destrutivo, nos quais os tubos de compósito foram levados à ruptura registrando-se a pressão máxima atingida, determinando-se as pressões médias de cada grupo.

Para a determinação das frações de massa dos tubos, amostras do compósito foram calcinadas em forno até 700°C em atmosfera inerte de nitrogênio ultra puro. A massa específica do compósito foi determinada pela técnica de deslocamento de líquido, de acordo com a norma ASTM D 792 (1983). As frações volumétricas foram calculadas utilizando-se as frações de massa e a massa específica para as configurações simétrica e assimétrica.

Uma análise numérica utilizando-se um programa de elementos finitos foi feita nos tubos fabricados com as configurações propostas neste estudo com carregamento hidrostático. Os cálculos foram executados para duas situações distintas. Na primeira delas, considerou-se como carregamento a pressão média de ruptura obtida por meio dos ensaios hidrostáticos para cada grupo de tubos, a fim de se obter as tensões atuantes nesta condição. Na segunda situação, os cálculos

foram realizados considerando-se o limite de resistência do compósito, a fim de se obter a pressão de ruptura dos tubos para esta condição.

Os dados de entrada para os cálculos foram as configurações de bobinagem de cada grupo de tubos, as espessuras médias das camadas, as pressões médias de ruptura obtidas nos ensaios e as propriedades mecânicas típicas de um compósito unidirecional ⁽⁷⁾, conforme Tabela 1, com 63% de fração volumétrica de fibra.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas típicas de compósito unidirecional.

Propriedades	Carbono/epóxi unidirecional
Módulo de elasticidade longitudinal E_1 (GPa)	142,0
Módulo de elasticidade transversal E_2 (GPa)	10,3
Módulo de cisalhamento G_{12} (GPa)	7,2
Coeficiente de Poisson ν_{12}	0,27
Limite de resistência a tração F_{1t} (MPa)	2280

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de fração volumétrica de fibra e pressão de ruptura obtidos para os grupos de tubos com configuração de bobinagem simétrica e assimétrica são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de fração volumétrica de fibra e pressão de ruptura dos tubos simétricos e assimétricos.

Tubos	Fração média de fibra (%)	Pressão média de ruptura (MPa)
Simétricos	$65,5 \pm 0,3$	$22,5 \pm 0,8$
Assimétricos	$66,2 \pm 0,7$	$20,9 \pm 0,7$

O pequeno desvio entre os valores médios de fração volumétrica de fibra, verificados na Tabela 2, permitiu inferir que o processo de fabricação garantiu componentes muito semelhantes e que as diferentes configurações de bobinagem não exerceram influência neste parâmetro. Portanto, foi possível fazer a comparação de desempenho dos dois tipos de configuração submetidos ao ensaio hidrostático.

Dos resultados das pressões médias de ruptura da Tabela 2, verificou-se que a capacidade de suportar o carregamento de pressão interna circumferencial foi diferente em cada grupo de tubos e está relacionada com a característica de simetria dos componentes ⁽⁸⁾. Na comparação entre as pressões médias de ruptura observou-se que os tubos com configuração de bobinagem assimétrica obtiveram média 7% inferior a média obtida para os tubos simétricos.

O modo de falha observado nos tubos com configuração simétrica foi caracterizado pela presença de uma trinca longitudinal que se estendeu de uma extremidade a outra do tubo e diversas trincas circumferenciais ramificadas desta trinca principal. Nos tubos com configuração assimétrica, além da trinca longitudinal, ocorreram trincas próximas de 45°, com forte evidência de tensões de cisalhamento provocadas pela assimetria ⁽⁸⁾.

Como mencionado anteriormente, foram feitas duas análises nos tubos fabricados utilizando-se o programa de elementos finitos. Na primeira delas obteve-se as tensões resultantes do carregamento das pressões médias de ruptura de 22,5MPa e 20,5MPa, respectivamente, dos tubos com bobinagem simétrica e assimétrica. Os resultados estão mostrados nas Figuras 1 e 2, as quais representam o corte longitudinal dos tubos. Nestes cálculos, as tensões atuantes em determinados pontos da espessura dos tubos foram registradas sobre as figuras para permitir uma melhor visualização do efeito que o carregamento hidrostático promoveu em cada estrutura.

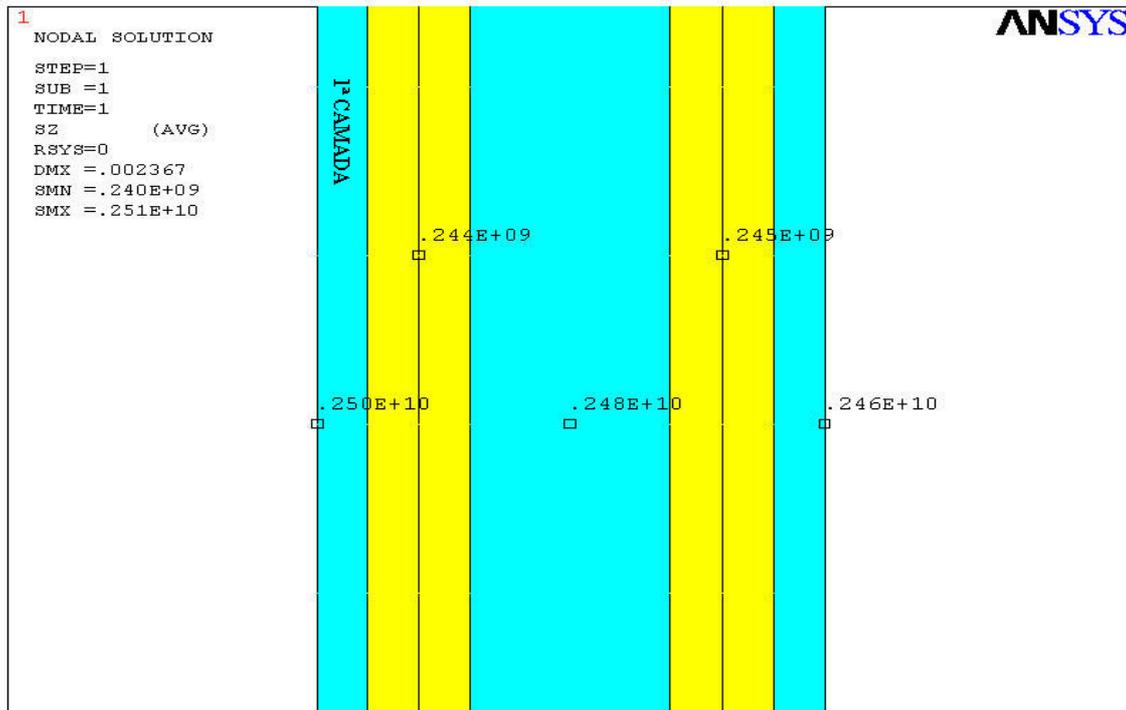


Figura 1 – Resultados da análise de tensões por elementos finitos em um tubo com configuração simétrica submetido à pressão média de ruptura de 22,5MPa.

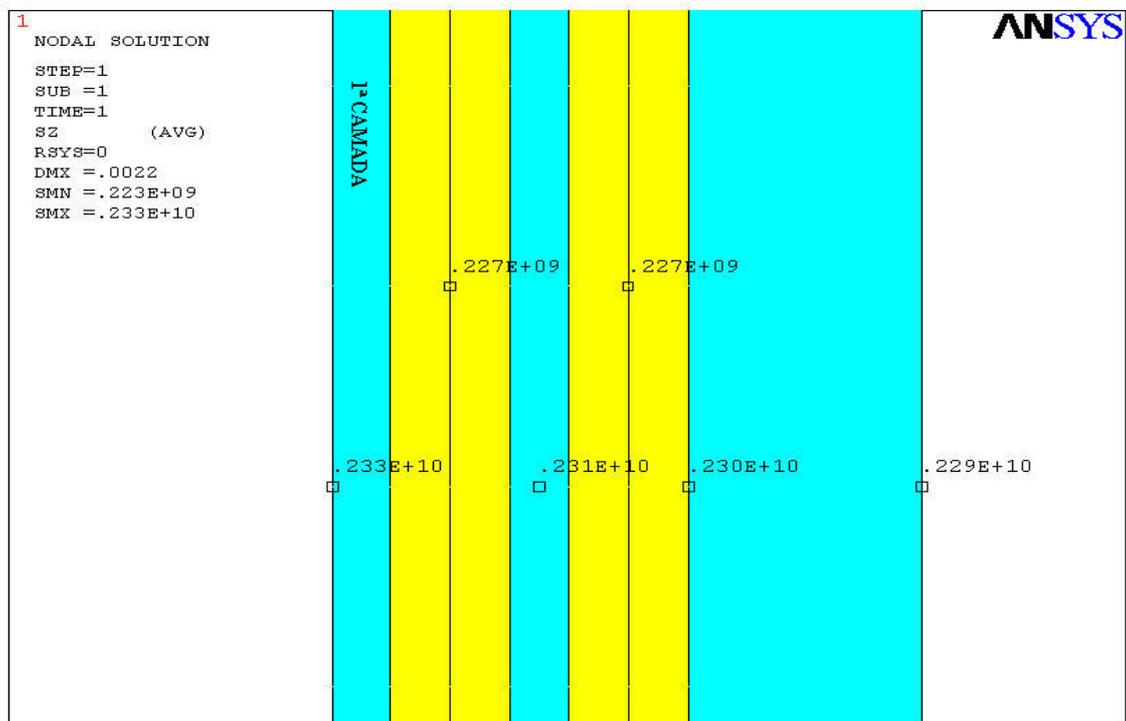


Figura 2 – Resultados da análise de tensões por elementos finitos em um tubo com configuração assimétrica submetido à pressão média de ruptura de 20,9 MPa.

As siglas DMX, SMN e SMX nas figuras anteriores representam, respectivamente, o deslocamento resultante máximo e as tensões circunferenciais mínima e máxima obtidas nos cálculos, dadas em Pascal (Pa). Na Figura 1, por exemplo, a tensão de 2500MPa (0.250E+10) posicionada sobre a primeira camada, representa a tensão circunferencial nesta camada, enquanto que a tensão de 244MPa (0.244E+09) representa a tensão circunferencial no primeiro par de camadas helicoidais.

Em ambas as configurações as tensões nas camadas circunferenciais decrescem da camada mais interna para a camada mais externa, indicando que a falha teria maior possibilidade de ocorrer nesta ordem. Analisando-se as tensões nas camadas helicoidais tem-se que estas são dez vezes menores que as tensões nas camadas circunferenciais.

Comparando-se os resultados das Figuras 1 e 2, não foi possível identificar a razão que levou à diferença obtida nos ensaios hidrostáticos. Assim, parecem existir fenômenos nos tubos assimétricos que provocam uma capacidade menor de resistir a pressões internas.

Na segunda análise foi aplicada a pressão de 20,5 MPa para as duas configurações, considerando o limite de resistência do compósito unidirecional em tração de 2280 MPa. Nas Figuras 3 e 4, respectivamente para os tubos com configuração simétrica e assimétrica, estão mostradas as tensões resultantes desta pressão.

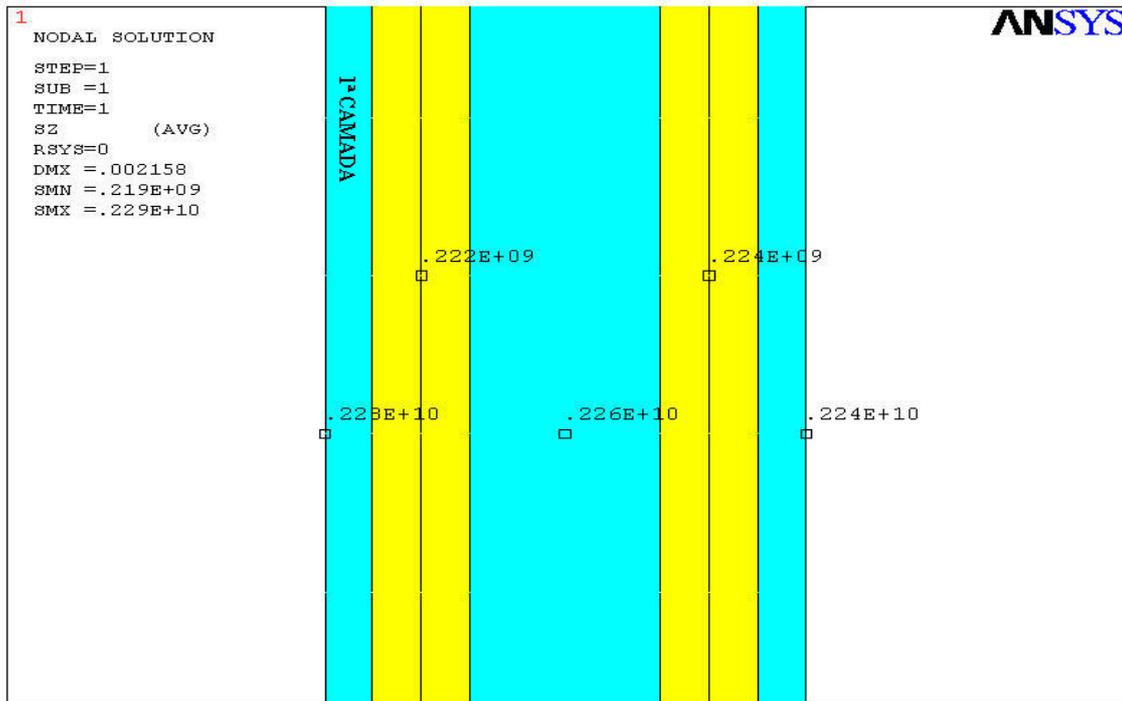


Figura 3 – Resultados da análise de tensões por elementos finitos em um tubo com configuração simétrica, submetido à pressão interna, para o limite de resistência a tração na direção da fibra de 2280 MPa.

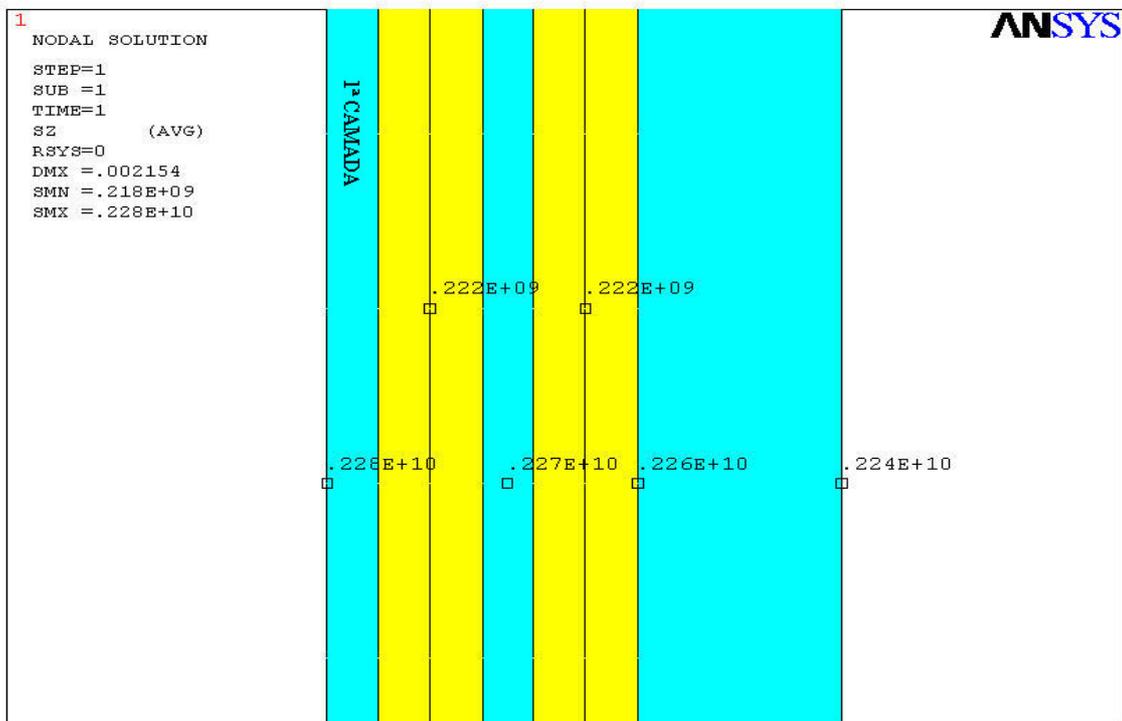


Figura 4 – Resultados da análise de tensões por elementos finitos em um tubo com configuração assimétrica, submetido à pressão interna, para o limite de resistência a tração na direção da fibra de 2280 MPa.

As tensões distribuíram-se de forma semelhante para as duas configurações e observou-se novamente que a máxima tensão circunferencial ocorreu na posição mais interna da parede dos tubos mantendo-se a diferença entre as tensões nas camadas circunferenciais e helicoidais.

Para uma análise completa de tensões utilizando-se programas de elementos finitos em estruturas de materiais compósitos poliméricos, seria necessário que as tensões obtidas para o sistema de coordenadas dos eixos globais da estrutura fossem transferidas para o sistema de coordenadas dos eixos locais de cada camada, permitindo a análise de falha. Isto corresponderia a rotacionar o sistema de eixos globais no ângulo da fibra de cada camada.

As folhas de respostas dadas pelo método numérico mostram apenas as tensões atuantes nas direções globais dos tubos. Assim, não foi possível identificar a existência de tensões cisalhantes presentes nos tubos com configuração assimétrica, conforme obtido no trabalho experimental.

Portanto, uma contribuição importante dada por este estudo foi mostrar a existência de tensões cisalhantes em tubos com bobinagem assimétrica, que podem comprometer o desempenho do componente e que podem não ser identificadas por programas de elementos finitos que assim não fornecem respostas satisfatórias para materiais que apresentam comportamento anisotrópico.

CONCLUSÕES

O programa de elementos finitos utilizado como ferramenta para análise de tensões nos tubos com as configurações propostas no trabalho não forneceu resultados que permitissem concluir que tubos fabricados com configuração assimétrica têm limite de resistência à ruptura inferior aos de configuração simétrica.

Os ensaios hidrostáticos revelaram que os dois grupos de tubos submetidos a pressão interna obtiveram pressão média de ruptura diferentes, devido às diferentes configurações de bobinagens testadas.

Nos tubos com configuração de bobinagem assimétrica a pressão média de ruptura foi 7% inferior que a pressão média de ruptura dos tubos com configuração simétrica. Isto mostrou que a assimetria presente em uma das configurações interferiu na capacidade de carregamento dos tubos assimétricos.

A comparação das respostas do método de elementos finitos com o ensaio hidrostático mostrou que o ensaio experimental pode contribuir com informações que não são obtidas pelo cálculo estrutural quando da análise de materiais anisotrópicos.

REFERÊNCIAS

1. ASM International, **Composites**. Engineered Materials Handbook, v. 1, USA, p. 463-465, 1987.
2. Strong, Dr. A. B. **Fundamentals of composites manufacturing: Materials, Methods and Applications**. Society of Manufacturing Engineers, USA, p. 87, 1989.
3. Carvalho, O.; Marinucci, G.; Rossi, J. L. Estudo do comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico com bobinagem simétrica e assimétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, XVI, 28 novembro a 02 dezembro, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: CBECIMAT, 2004.
4. Hoover, J. W.; Kujawski, D.; Ellyin, F. Transverse cracking of symmetric and unsymmetric glass-fibre/epoxy-resin laminates. **Composites Science and Technology**, v. 57, p. 1513-1526, 1997.
5. Hudson, R. C.; Davidson, B. D.; Polaha, J. J. Effect of remote ply orientation on the perceived mode I and mode II toughness of θ/θ and $\theta/-\theta$ interfaces. **Applied Composite Materials**, v. 5, p. 123-138, 1998.
6. Marinucci, G. **Desenvolvimento, Fabricação e Análise de Fratura de Cilindros de Fibra de Carbono Colapsados por Pressão Interna**. 2001, 182p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo.
7. Daniel, I. M.; Ishai, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Press, USA, p. 34, 1994.
8. Carvalho, O. **Influência da configuração de bobinagem no comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico**. 2006, 86p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo.

PERFORMANCE EVALUATION OF POLYMERIC COMPOSITE PIPES COMPARING FINITE ELEMENT METHOD RESULTS AND HYDROSTATIC TEST

ABSTRACT

Composite material pipes are used in many applications in the industry due to high mechanical strength and low density when compared to the materials traditionally used. Due to material anisotropy, the composite material structure analysis demands tools that can be able to lead with this characteristic, as the finite element methods. In this study, the filament wound pipes strength were obtained by hydrostatic tests and compared with numeric method results. The carbon fiber reinforced polymeric pipes were manufactured with the followings configurations symmetrical and asymmetrical, $[90^\circ/-30^\circ/+30^\circ/90^\circ_2]_S$ e $[90^\circ/-30^\circ/+30^\circ/90^\circ/+30^\circ/-30^\circ/90^\circ_4]_T$, respectively. Pipes hydrostatically tested revealed different failure modes and mechanical strength for each adopted stacking sequence of plies, differences that were not noticed by the finite element method.

Key-words: composite, filament winding, hydrostatic, finite element.